

同步电机

理論与行为

查理士·康柯蒂亞原著

高等教育出版社

56

1.

18

本書系根据美国通用电气公司 (General Electric Company) 出版的查理士·康柯蒂亞 (Charles Concordia) 著“同步电机, 理論与行为” (Synchronous Machines Theory and Performances) 1951 年版譯出。本書主要研究同步电机的瞬态理論。書中采用了基本的数学分析, 發展了一些基本方程式, 这些方程式可用以計算同步电机瞬态的短路电流和轉矩, 同步及异步运轉中的稳态功率、轉矩和电流, 以及負載突然投入后的电压波动。它所引述的研究方法及所得的結論可供設計同步电机时参考。

本書可供高等工業学校电机制造專業作参考書, 也可供电机設計工作者参考。

同 步 电 机

理 論 与 行 为

查 理 士 · 康 柯 蒂 亞 原 著

曾 繼 鐸 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版 北 京 琉 璃 廠 170 号

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 054 号)

京 華 印 書 局 印 刷 新 華 書 店 總 經 售

統一書号 15010·626 開本 850×1168 $1/32$ 印張 7 $5/16$ 字數 173,000 印數 0001—2,500

1958 年 2 月第 1 版 1958 年 2 月北京第 1 次印刷 定價 (10) 元 1.10

原 序

这本书的主要目的，乃欲介绍同步电机瞬变行为(performance)基本电路理论的綜合發展；这种理论，曾为直接从事于预决电机行为的工程师們所通用。書中材料是給通用电气公司过去三年中所設的同步电机課程而写的。所呈現的一般方程式，可用以計算瞬态的短路电流和轉矩；同步運轉时和起步过程中的稳态功率、轉矩和电流；以及負載突然投入后的电压波动。重点放在相当严格的数学分析和获得电机的基本物理知識上，以期讀者在需要的时候，有能力去推广这个理論。

作者假定，讀者知道但不一定要熟悉：

1. 靜电路普通的稳态和瞬态理論，包括电路中电磁感应的基本定律。
2. 同步电机的一般構造。
3. 普通微分方程以及运算微积各种形式的最少一种。
4. 关于圓轉子交流旋轉电机的通行的大学課程；它只包括稳态行为。
5. 对称分量法。
6. 电机和电力系统参数表示法的标么系統。

因而，这本书主要是給實習工程师使用的，他們需要學習同步电机瞬态理論的某些知識，但他們过去不得不在近二十五年来技术文献中去遍寻这些东西。在这本书里，虽能找到关于許多特定情况的公式，但它不預备作参考書之用。反之，它却是供人們从头到尾閱讀的。

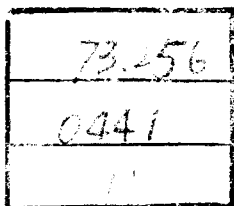
熟悉同步电机文献的人們自然明了，为統一起見，其中許多演算和符号、以至在某些情况中的結論的形式，都經過了一番整理。

特别是在推导一般方程式的方法和对单相短路的处理上，曾不得不大事校訂。此外，还增加了某些新的材料。这些新項目是：双綫对地短路、短路轉矩的單向分量、起步轉矩、和負載投入后的电压低落的研究。

在这本書里所介紹的理論，是許多工程师在大約二十五年以上的时期內登峰造極的工作。因为他們实在多得难以陈述，所以只能通过参考書刊表和圖書目录来表达作者对这些来源的謝意。然而，我需要特別感謝 S. B. 克萊利(Crary)先生經常的鼓励和支持，和 G. 克朗(Kron)先生对观点的帮助。我必須再申述我的信念，所以能获得這本書可能有的質量，其主要的因素是某一大工業公司的風气，这种風气，把为了与最新的实际直接接触而必需的工作、和获得由它的規模所提供的專業的机会有結合起来了。

查理士·康柯蒂亞

一九五一年三月



目 录

原序	v
1. 同步电机物理的叙述	1
2. 同步电机数学的叙述	5
电压的关系式(7) 磁链的关系式(8) 感应系数的关系式(9) 方程式的 变换(13) 电枢电压方程式(16) 运算阻抗(18) 标么量(21) 求 x_d 和 x_q 的转差试验(23) 求 x_d 的短路试验(25) 零序电抗(26) 功率输出(26) 转矩(29) 总结(31) 习题(32)	
3. 稳态的、平衡的、同步运转	34
稳态的矢量图(34) 磁场磁链(36) 功率输出(38) 功率的角特性(39) 稳定度(43) 无功伏安(46) 关于两台电机功率的角特性(48) 总结(53) 习题(54)	
4. 三相短路电流	55
整步电流(60) 短路电流的稳态分量(61) 短路试验(68) 计及电枢电阻的 短路(69) 磁场电流(74) 总结(76) 习题(77)	
5. 单相短路电流	78
线对线短路(78) 相量(83) 线对点短路(84) 线对线障碍中的空开路相电 压(87) 电压和电流的谐波分量(88) 衰减因数(92) 磁场电流(98) 总结 (100) 习题(101)	
6. 双线对地短路及连续的障碍	108
对称分量(106) 转子衰减因数(111) 定子或电枢衰减因数(113) 磁场电流 (116) 开路相电压(116) 连续障碍的发生(117) 总结(121) 习题(122)	
7. 短路转矩	121
三相短路-忽略全部电阻(123) 三相短路-电枢电阻的效应(125) 三相短 路-转子电阻的效应(127) 关于三相短路转矩的讨论(131) 线对线短路 (139) 转矩(140) 短路的其他型式(147) 线对点短路的谐波分量(151) 转矩的单向分量(152) 由于电流直流分量而产生的转矩单向分量(162) 近似 的转矩方程式(165) 总结(168) 习题(169)	
8. 起步转矩	170

498618

等效电路(176) 关于近似的轉矩方程式(176) “精确”法和近似法的比較 (180) 平均轉矩(d 和 q 軸法)(182) 磁場激励(185) 总結(188) 習題 (189)	
9. 电压低落	190
电压調整器的效应(196) 最低电压(198) 所需的励磁机限值(201) 飽和 (201) 励磁机的适应能力(203) 电压恢复的时间(206) 原有負載的影响 (206) 磁場电流(208) 总結(208) 習題(209)	
附录	211
甲. 在双綫对地障碍中,表示电流的佛里哀級数,及 i_d 与 i_q 的基頻分量(211)	
乙. 轉矩(217)	
参考書刊	221
圖書目录	224

1. 同步电机物理的叙述

一部同步电动机或发电机,实质上系由两个元件所组成的:第一个产生磁场,第二个是一组电枢线圈;由于这两个元件的相对运动在电枢线圈里产生电压。在普通的新式电机里,磁场结构是在定子里面旋转的,这个定子支撑着电枢绕组,并给电枢绕组提供磁通的路线。激励的磁场寻常是由一组装在运动的元件上,即转子上的线圈(磁场绕组)所产生的。因为绝大部分的电力是以三相功率的形式产生的,而在消耗大量功率之处,也是以三相功率的形式来供应的,通常有三组电枢线圈,以 120° 的间距沿定子排列,使得当磁场以定速旋转的时候,在线圈里所产生的电压的相位相互移开 120° 。关于最后的这段话,应该在这里给两节按语。

1. 不加附带条件时,这句话只适用于二极(即一对极)电机。在一台备有两对极的电机里,必须相应地具有两套相隔 180° 的电枢线圈,而每一套的三个线圈,各相隔 60° 。图 1 就说明了这些线圈的布置情形,以及二极和四极电机磁通的路线。说得更为普遍一些,每一套的三个线圈必须相隔 $120/n$ 度,而各套相隔 $360/n$ 度;这里的 n 是极对数。通行而且便利的方法是用“电度”来测量线圈之间的距离。 360 电度对应于包含在一对极中的角度,而 360 真的(即机械的)角度乃等于 $360 n$ 度。这样说来,通过电度来测量距离,每一套的三个线圈总是相隔 120 度的。

2. 不论磁场的旋转速度怎样,所产生的稳态电压(当负载平衡的时候)在相位上总是相隔 120° 的。也就是说,因为 $\left(\frac{1}{n}\right)$ 转(等于一对极所占空间的位移)总是对应于发生电压的一周,即基频总是恰恰等于旋转速度的 n 倍,并且因为转速恒定的时候,转子移

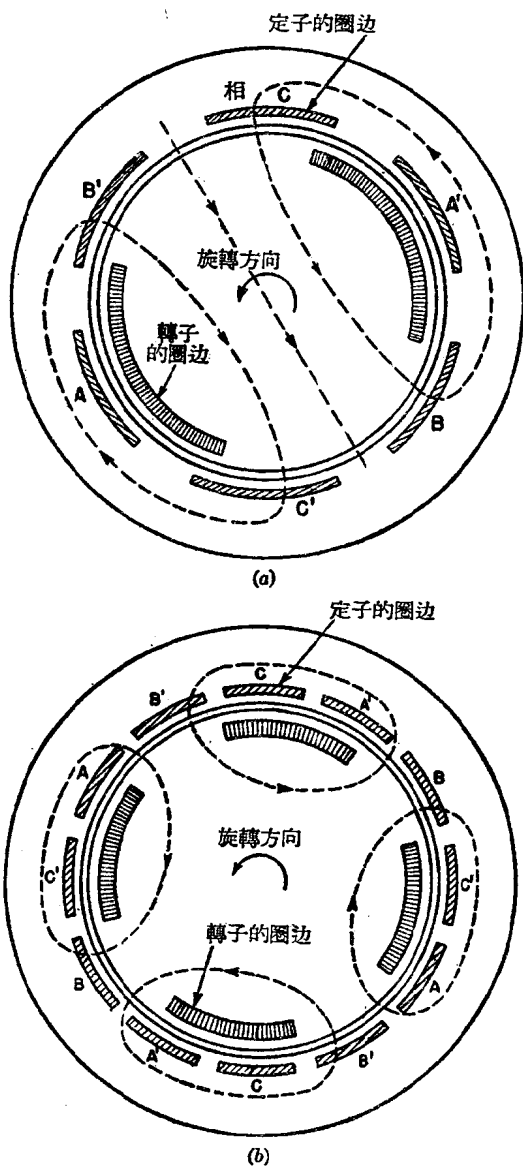


圖 1. 在二極和四極电机里繞圈的布置圖。

动一定距离所需的时间与所移动的距离成正比，所以轉子从对着一个线圈的任一給定的位置移到对着第二个线圈的对应位置所需要的时间，准是一周的三分之一或 120 电度。当然，这台电机通常是接到三相匯流排的，同时且有别的同步电机对这匯流排供給电压，因此，除非这台电机和接到这个系统的其余电机同步，这个外施电压就不会与它的旋轉速度相对应。所以“同步电机”这个名詞是指某一普通和别的同样类型的电机保持同步运行的电机，而同步運轉、失去同步、和脫步这些名詞，只在

对一台接到某系统的电机而言时才有意义,对单独运行的电机来说,是没有意义的。

因为在正常运转的时候,由磁场绕组所产生的磁通是对着定子绕组和支撑这个绕组的磁性结构而旋转的,在铁里和在线圈里一样产生电压;这就需要把定子铁分成薄片,以开断涡流的路径,借以减少 i^2r 损耗以及那不这样就会发生的短路效应。

另一方面,磁场结构或转子主要只须承受一些恒定的磁通,因而不必全部分成薄片。当具有同步频率的三相平衡电枢电流流动的时候,由这些电流所产生的磁势就联合构成一个合成磁势,而这个磁势以和磁场一样的速度而旋转。人们已经找到研究这个电枢磁势效应的最好办法,就是把它分成空间谐波;从而可以发现,基本分量是以转子的速度旋转的,所以对磁场来说,它是静止的;而其他的空间谐波则以不同的速度旋转,所以对磁场而言,它们是运动的。因为电枢线圈沿定子面的分布,是为了想尽量减弱除空间基波以外的全部谐波而设计的,从运行的情况看来,可以认为这些谐波的效应是次要的。它们增强电枢的漏抗(即增强那个不与任何转子绕组链合的电枢磁通的部分),并在转子的表面上引起涡流损耗;因而只要可能,最少应该把转子铁的表面分成薄片。总的说来,除了高速的二极或四极汽轮发电机之外,所有的电机实际上都有叠片的极面,并用图 2 所示的显极构成,只有二极或四极电机的转子可以做成一整块的钢。在图 2 里也能看到一个阻尼绕组,它通常是由一组紫铜或黄铜条所组成,装在电机极面的槽里,并在端部连接起来。这阻尼绕组有几个有用的功能_[1]^①: 利用阻尼绕组当作感应电动机的鼠笼,使得同步电动机可以当作感应电动机起步;帮助抑制转子的振荡;用以在某种短路的情况之下减低过电压;促进电机的整步。

① 方括弧里的数字系指本书末参考书刊表中的项目。

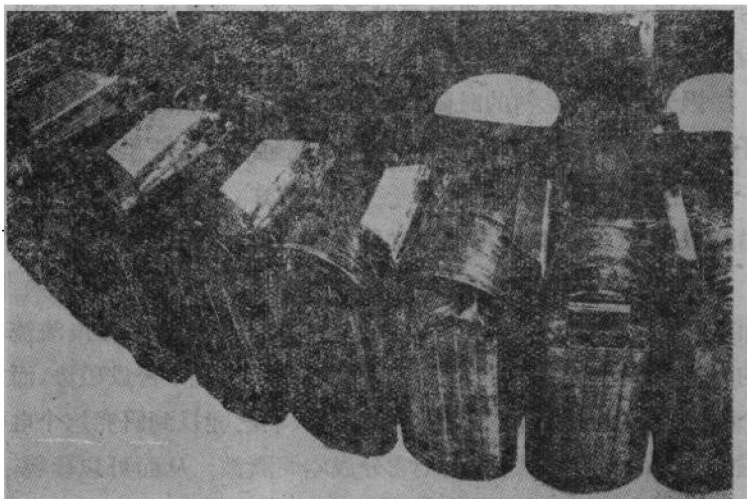


圖 2. 显極电机的轉子。

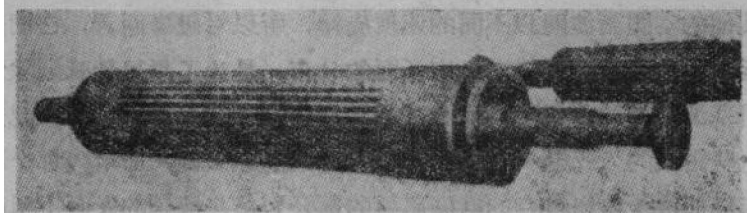


圖 3. 整塊轉子电机的轉子。

圖 3 顯示着整塊轉子的二極汽輪發電机的兩種轉子。在這個情況之下，整塊的鋼轉子自己就提供了阻尼繞組的作用。

從上面的概述中可以了解，同步电机的定子和轉子，在下述各方面不同：定子多少是標準化了的，不論同步电机的类型怎样，它的形狀是比較簡單的；此外，就三相的任一相而論，它是完全對稱的。另一方面，轉子却有許多种型式，最簡單的情況是在還算對稱的疊片轉子上裝着一個單獨的磁場繞組，然後是一個其阻尼繞組為幾個繞組組成的显極轉子，或是一個雖然除磁場之外對稱，但仍舊複雜的整塊轉子。整塊轉子之所以複雜，因為那個整塊的鋼轉子是可以當作一個电路無限多的阻尼繞組來看待的。

2. 同步电机数学的叙述

我們已在第一章里指出,同步电机是由两个主要部件、即定子和轉子所組成;它們处于相对运动之中,而且結構非常不同。尽管如此,仍只需通过全部繞組的自感和互感系数,就可以写出电路电压方程式。为了要做这件事,我們必須首先判明轉子繞組是什么东西。

我們假定,轉子的磁路以及它的全部电路都是环繞着如圖 4 所示的显極电机的極軸和極間軸而对称的。磁場繞組当然是和別的繞組分开的,而且它的軸綫和極的軸綫相重合。阻尼繞組全部連接起来,成为連續的網形联接,不过,如果它們是对称地排列着的話,电流的路綫,也可以选得繞着極軸和極間軸而对称。圖 4 显示着所选的电路。从与極軸重合的縱軸开始,給銅条編号,再用

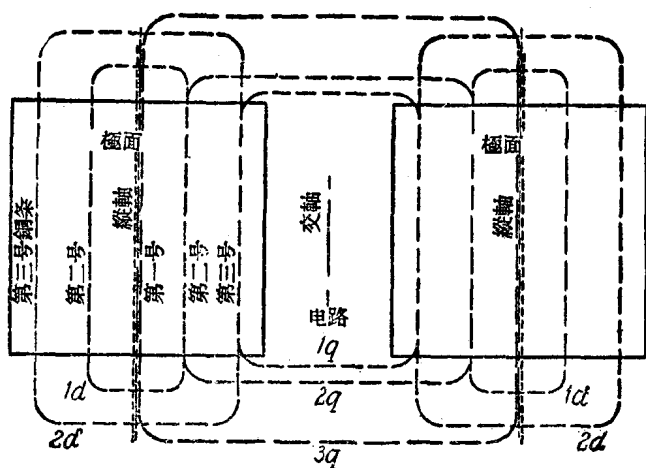


圖 4. 轉子电路的編号組尼繞組电路的圖解。

$1d, 2d$ 等等給縱軸电路編号，以便和这些銅条相对应。在正常的轉子旋轉的方向上，取超前于縱軸 90° 电度的軸綫当作交軸，从这个軸向外，依次用 $1q, 2q$ 等等来給这个軸綫上的电路編号。轉子电路的这种选择，具有使縱軸和交軸轉子电路之間的互感系数和互用电阻全部为零的好处。有些电机里，阻尼条不在兩極之間連接，但因这些銅条未經絕緣，即使在这样的情况之下，电流仍旧可以在电机的端部通过轉子本身的鉄而在兩極之間流动。这个缺乏絕緣的事实，还意味着电路方程式只是近似的因为在实际的情况里，有些电流可能通过鉄而散开。除了在涉及極間鉄的电路的地方，及除了鉄里的电流成为全部阻尼效应的汽輪發电机里，这个效应是微不足道的。因为汽輪發电机在这方面很不同于显極發电机，讓我們理解了显極的情况之后，再来單獨研究汽輪發电机的情况。

定子和轉子之間的全部互感系数，是轉子角位的周期性函数。此外，由于轉子有显極的緣故，任何兩個定子相之間的互感系数也是轉子角位的周期性函数。这样，我們得到其系数大部分都是轉子角位周期性函数的微分方程式系；因此，甚至在轉子速度为恒定的情况之下（如果略去飽和，方程式应是綫性的），它們仍是棘手而难解的。然而，人們已經發現，如果作出某些合理的假定，經過比較簡單的变数变换后，会使这些麻煩的角函数从这些方程式里澈底消去。

第一个假定是，單就定子对轉子的全部互感效应來說，定子繞組是按正弦律沿着气隙分布的。差不多在所有的同步电机里，繞組的分布都是在可行的範圍內尽量消灭全部諧波的^[2]。从这一点看来，这个定子繞組正弦分布的假定可算是合理的。主要的証明还在于根据这个假定所算得的行为，与由試驗而得的行为相比較，是趋于一致的。

第二个假定是，定子的槽不致于使轉子的任一感应系数因轉

子角位的不同而有显著的变化。对于每極槽数很多的电机而言，这个說法是容易理解的，但对槽数少的（特别是整数槽的）电机来说，就不那样明显了。然而，少数槽主要發生在極数多的电机里，因而槽的任何效应，还可以从整个电机平均計算。最后的証明也是从比較理論与实验的結果而来。

將在这本書里作出的第三个假定，目前至少可以說是，饱和可以忽略。涉及饱和的各项假定的影响，將在以后指出。

現在，可以用下面的方程式，来叙述同步电机的电的行为。

电压的关系式

电樞或定子

$$\begin{aligned} e_a &= p\psi_a - ri_a \\ e_b &= p\psi_b - ri_b \\ e_c &= p\psi_c - ri_c \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $e_a = a$ 相的端压。

$\psi_a = a$ 相的总磁鏈。

i_a 是在 a 相中的电流。請注意所取电樞电流的正向，是与可能見于靜止網絡的正向电流相反的；这是为了使正电流对应發电机的作用。

a, b, c 是照圖 5 所示轉子旋轉的方向而注明的三相。

r = 每一电樞繞組的电阻，假定在 a, b, c 三相里都是一样的。

p = 导数运算符 d/dt , t = 時間。

磁場

$$e_{fd} = p\psi_{fd} + r_{fd}i_{fd} \quad (2)$$

在这里和在下面的方程式里， e, ψ, i 这些符号，和上面一样、有同样的意义，其下标指所論的电路。

縱軸阻尼繞組

$$\begin{aligned}
 0 &= p\psi_{1d} + r_{11d}i_{1d} + r_{12d}i_{2d} + \dots \\
 0 &= p\psi_{2d} + r_{21d}i_{1d} + r_{22d}i_{2d} + \dots
 \end{aligned} \quad (3)$$

余类推。

这里,下标 $12d$ 和 $21d$ 是指 $1d$ 和 $2d$ 电路之间的相互效应(請參看圖 4)。應該注意, 阻尼繞組同时是电阻耦合与电感耦合的; 由于轉子对縱軸和交軸对称, 在縱軸和交軸电路之間, 是沒有耦合的。

交軸阻尼繞組

$$\begin{aligned}
 0 &= p\psi_{1q} + r_{11q}i_{1q} + r_{12q}i_{2q} + \dots \\
 0 &= p\psi_{2q} + r_{21q}i_{1q} + r_{22q}i_{2q} + \dots
 \end{aligned} \quad (4)$$

余类推。

磁鏈的关系式

电樞

$$\begin{aligned}
 \psi_a &= -x_{aa}i_a - x_{ab}i_b - x_{ac}i_c + x_{af}i_{fd} + x_{a1d}i_{1d} + x_{a2d}i_{2d} \\
 &\quad + \dots + x_{a1q}i_{1q} + x_{a2q}i_{2q} + \dots \\
 \psi_b &= -x_{ba}i_a - x_{bb}i_b - x_{bc}i_c + x_{bf}i_{fd} + x_{b1d}i_{1d} + x_{b2d}i_{2d} \\
 &\quad + \dots + x_{b1q}i_{1q} + x_{b2q}i_{2q} + \dots \\
 \psi_c &= -x_{ca}i_a - x_{cb}i_b - x_{cc}i_c + x_{cf}i_{fd} + x_{c1d}i_{1d} + x_{c2d}i_{2d} \\
 &\quad + \dots + x_{c1q}i_{1q} + x_{c2q}i_{2q} + \dots
 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 x 是感应系数, 并將在以后加以解釋。下标和以前一样, 是指所涉及的电路。

磁場

$$\begin{aligned}
 \psi_{fd} &= -x_{fad}i_a - x_{fbd}i_b - x_{fcd}i_c + x_{ffd}i_{fd} + x_{f1d}i_{1d} + x_{f2d}i_{2d} \\
 &\quad + \dots + x_{f1q}i_{1q} + x_{f2q}i_{2q} + \dots
 \end{aligned} \quad (6)$$

縱軸阻尼繞組

$$\begin{aligned}\psi_{1d} = & -x_{1ad}i_a - x_{1bd}i_b - x_{1cd}i_c + x_{1fd}i_d + x_{11d}i_{1d} + x_{12d}i_{2d} \\ & + \cdots + x_{1d1q}i_{1q} + x_{1d2q}i_{2q} + \cdots,\end{aligned}\quad (7)$$

余类推。

交軸阻尼繞組

$$\begin{aligned}\psi_{1q} = & -x_{1aq}i_a - x_{1bq}i_b - x_{1cq}i_c + x_{1qf}i_d + x_{1q1d}i_{1d} + x_{1q2d}i_{2d} \\ & + \cdots + x_{11q}i_{1q} + x_{12q}i_{2q} + \cdots,\end{aligned}\quad (8)$$

余类推。

感应系数的关系式

电樞的自感系数

任一电樞繞組的自感系数，都在从極軸和相軸重合时的最大值，到極間軸和相軸重合时的最小值之間周期地变化着。由于轉子的对称，这个感应系数一定有一个 180 电度的周期，并且一定可以用偶倍数角的余弦級数来表达。在正弦的繞組分布假定之下，可以証明。只有这个級数最前面的兩項是重要的，即

$$x_{aa} = x_{aa0} + x_{aa2} \cos 2\theta_a \quad (9)$$

其中 θ_a 是依轉子旋轉的方向而測量的、縱軸离开 a 相軸綫的角度。

由于繞組的分布是正弦的， a 相里的电流，在气隙中产生一个磁势空間諧波，对轉子而言，它仅属于基本諧波。它可以便利地分成与 $(\cos \theta_a)$ 和 $(-\sin \theta_a)$ 成比例的兩個分量，分別作用于縱軸和交軸上（請參看圖 5）。这些磁势分量所产生的相应磁通分量是大小为 $(\phi_d = P_d \cos \theta_a)$ 和 $(\phi_q = -P_q \sin \theta_a)$ 底空間基本分量，其中 P_d 和 P_q 是分別地正比于縱軸和交軸的有效磁导系数的。它也产生空間諧波磁通分量，但因这些分量不鏈定子，現在和我們無關。这样說来，由于这个磁通而發生的 a 相磁鏈应和下式成比例（請參看

圖 5)。

$$\begin{aligned}
 \phi_d \cos \theta_a - \phi_q \sin \theta_a &= P_d \cos^2 \theta_a + P_q \sin^2 \theta_a \\
 &= \frac{1}{2}(P_d + P_q) + \frac{1}{2}(P_d - P_q) \cos 2\theta_a = A + B \cos 2\theta_a
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

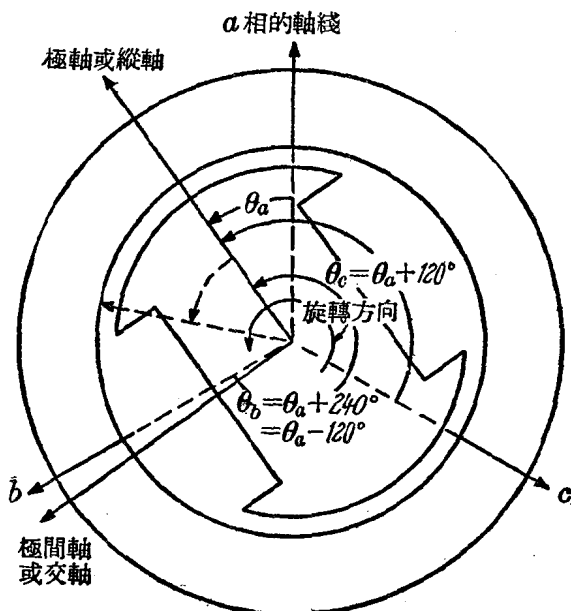


圖 5.

还有一些鏈着 a 相而不鏈轉子的磁通。这个磁通可归并到方程式 10 的常数項 A 內，因而感应系数还是保持着方程式 9 的形式。

类似地，

$$x_{bb} = x_{aa0} + x_{aa2} \cos 2\theta_b \quad (11)$$

$$x_{cc} = x_{aa0} + x_{aa2} \cos 2\theta_c$$

其中，

$$\begin{aligned}
 \theta_a &= \theta \\
 \theta_b &= \theta - 120^\circ \\
 \theta_c &= \theta + 120^\circ
 \end{aligned}
 \quad (12)$$

电枢的互感系数

要决定例如 a 相和 b 相之间的互感系数的形式，我們得首先認識到，有一部分不和轉子相鏈的互感磁通，是和角度沒有关系的。那末，就 a 相里的电流而論，气隙磁通分量和以前一样正比于

$$\phi_d = P_d \cos \theta_a$$

$$\text{和} \quad \phi_q = -P_q \sin \theta_a \quad (13)$$

而这些分量与 b 相的磁鏈正比于

$$\begin{aligned} \phi_d \cos \theta_b - \phi_q \sin \theta_b &= P_d \cos \theta_a \cos \theta_b + P_q \sin \theta_a \sin \theta_b \\ &= P_d \cos \theta \cos(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + P_q \sin \theta \sin(\theta - 120^\circ) \\ &= -\frac{1}{4}(P_d + P_q) + \frac{1}{2}(P_d - P_q) \cos 2(\theta - 60^\circ) \\ &= -\frac{1}{2}A + B \cos 2(\theta - 60^\circ) \\ &= -\left[\frac{1}{2}A + B \cos 2(\theta + 30^\circ) \right] \end{aligned}$$

总的互感系数因而属于下面的形式，

$$x_{ab} = -[x_{ab0} + x_{aa2} \cos 2(\theta + 30^\circ)]$$

請注意，互感系数的可变部分与自感系数的可变部分恰有同样的大小；而它的恒定部分的大小，非常接近自感系数恒定部分的一半。我們現在既然知道了答案，从对称上考虑，显然当極軸以 30° 落后于 a 相，或 30° 超前于 b 相时，这个互感系数 x_{ab} 应该有一个最大值(負的)，而当它位于这两相中間时，应该有一个最小值(負的)。我們也可以合理地設想，高次諧波各項不能在互感系数里出現，因为它們在自感系数里也給抹去了。

最后，我們能够把定子的全部互感系数写成

$$\begin{aligned} x_{ab} &= x_{ba} = -[x_{ab0} + x_{aa2} \cos 2(\theta + 30^\circ)] \\ x_{bc} &= x_{cb} = -[x_{ab0} + x_{aa2} \cos 2(\theta - 90^\circ)] \\ x_{ca} &= x_{ac} = -[x_{ab0} + x_{aa2} \cos 2(\theta + 150^\circ)] \end{aligned} \quad (14)$$